

## 실드테일보이드에 의해 발생하는 지표구조물의 침하 억제를 위한 마이크로파일의 적용

### An Application of Micropile to Restrain the Settlement of Structure on the Ground Surface caused by Shield Tail Void

임종철<sup>1)</sup>, Jong-Chul Im, 윤이환<sup>2)</sup>, Lee-Hwan Yoon, 박이근<sup>3)</sup>, Lee-Keun Park, 고희성<sup>4)</sup>, Ho-Seong Ko,

<sup>1)</sup> 부산대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Pusan National Univ.

<sup>2)</sup> (주)동아지질 부장, Director, Dong-A Geological Engineering Co., LTD.

<sup>3)</sup> 부산대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

<sup>4)</sup> 부산대학교 토목공학과 박사과정 수료, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

**SYNOPSIS** : In soft ground tunneling, shield method is very good for safety of neighboring structures. Although shield tunnel method has the merits to minimize the deformation of ground around tunnel, ground deformations occurred until the material grouted in tail void hardens are inevitable.

In this study, the effects of micropile used as one method to restrain the settlement of neighboring structures by the tail void are studied by laboratory model tests. As a basic test result, the effective direction of micropile and the restraint rate of settlement by micropile reinforcement are known.

**Key words** : shield tail void, micropile, settlement rate of structure, surface settlement

## 1. 서론

실드터널 굴착시 예상되는 지반변형의 종류로는 선형변형, 막장 전면부 변형, 실드통과 변형, 테일보이드 변형, 후속변형 등이 있는데, 밀폐형 실드가 대부분을 점하고 있는 현재에 있어서는 일반적으로 이들 변형 중 테일보이드에 의한 지반변형이 가장 크기 때문에 이를 해결하고자 하는 노력이 많이 진행되고 있다.

본 연구에서는 실드터널 굴착시 발생하는 테일보이드에 의한 인접 지표구조물의 침하를 억제하는 방법을 강구하기 위해 실내모형실험을 실시하였다. 침하 억제대책으로는 마이크로파일을 이용하였으며, 실험을 통해 마이크로파일의 효과적인 설치방향에 대해서 연구하였다.

또한, 지표구조물과 터널과의 거리에 따른 침하량과 억제효과에 대해서도 연구하였으며, 이는 현장에서 실드 터널시공시 구조물 침하 억제대책에 적용할 수 있는 기초자료가 될 수 있을 것이다.

## 2. 모형지반의 요소시험

## 2.1 지반재료의 물성치

모형실험용 지반재료로 물로 씻어 입도조정한(#20~#200) 공기건조 구포사를 사용하였다. 모형지반의 상대밀도를 구하기 위해서 행한 최대·최소건조밀도시험은 JSF T 161-1990에 의거하여 실시하였다. 지반재료의 물성치와 입도분포곡선은 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1. 지반재료의 물성치

물성종류	기호	물성치
최대간극비	$e_{max}$	1.065
최소간극비	$e_{min}$	0.751
최소건조밀도	$\gamma_{dmin}(g/cm^3)$	1.293
최대건조밀도	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	1.508
비중	$G_s$	2.64
함수비	$w(\%)$	0.342
평균입경	$D_{50}(mm)$	0.325
유효입경	$D_{10}(mm)$	0.185
균등계수	$C_u$	1.95
곡률계수	$C_g$	1.10

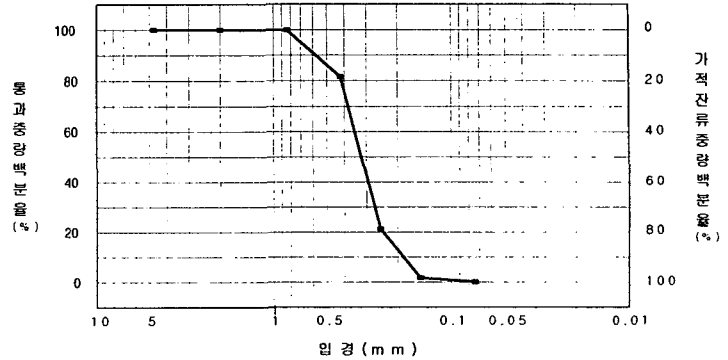


그림 1. 지반재료의 입도분포곡선

## 2.2 모형지반의 평면변형률 압축시험(요소시험)

모형지반용 공기건조 구포사에 대해 압밀배수 평면변형률 압축시험을 실시하여 표 2와 같은 결과를 얻었으며, 여기서 평균적으로 구한 전단저항각  $\phi_{ps} = 54.1^\circ$  였다. 이 때의 시료밀도에 대해서는 2.3절 참조.

표 2. 모형지반용 구포사의 평면변형률 압축시험 결과

CASE	$(\sigma_3)_f$ kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ kPa	$(\epsilon_d)_f$ (%)	$\phi_d$	$\tan \phi_d$
I	50	450	3.37	54.870	1.421
II	60	519	2.53	54.283	1.391
III	75	590	3.48	53.846	1.369
IV	95	832	5.07	54.479	1.401

## 2.3 낙하고에 따른 밀도시험

여러 실험결과를 상호 비교하기 위해서는 각 실험에서 성형한 지반이 균일하고 같은 정도의 밀도를 가져야 한다. 이를 보장하기 위해서 슬롯형 뿌리기로 시료를 공중낙하하여 지반을 성형하였다. 또한, 사전에 낙하고를 결정하기 위해 낙하고에 따른 밀도시험을 행하여 그림 2와 같은 결론을 얻어 낙하고를 1200mm로 유지하면서 전반적인 실험을 행하였다. 그 결과, 모든 요소 및 모형실험에서 거의 동일한 밀도를 얻었다.

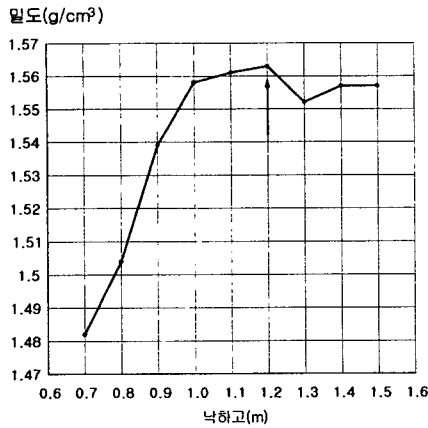


그림 2. 낙하고에 따른 밀도시험

### 3. 실내 모형실험

굴착된 터널에서 발생하는 테일보이드를 근사시키기 위해 평면변형률 상태의 터널 횡단면을 사용하였다.

#### 3.1 실험장치의 개요

본 연구에서 사용한 평면변형률 토조는 그림 3과 같으며, 그 제원은 720(H) × 1650(L) × 400(W) mm( $V=0.475m^3$ )이다. 토조의 앞면과 뒷면으로는 마찰이 비교적 작은 투명 아크릴판을 사용하여 평면변형률 상태에 근사하도록 하였으며, 이를 통해 지반의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 아크릴판의 외부 전·후방부에는 충분한 강성을 가진 강재로 보강하여 실험 중 외력에 의한 토조의 변형을 억제하였다. 또한 지반의 거동을 관찰하기 위하여 아크릴판 안쪽면에 격자가 인쇄된 타겟을 2cm 간격으로 부착하여 지반의 유한요소를 형성하였으며, 격자의 변위 추이를 사진법<sup>1)</sup>을 이용하여 측정 후, 유한요소법을 이용하여 지반의 거동을 분석하였다.

#### 3.2 모형터널

횡단방향 모형터널장치는 직경(D)이 180mm로 외부의 핸들을 회전하여 터널의 직경을 초기직경의 10%까지 축소시킬 수 있도록 스텐레스 재질로 제작되었다. 터널장치의 뼈대구조는 외부에서는 고무멤브레인으로 감싸서 터널의 원형을 유지하도록 하였으며, 뼈대구조간의 접촉면 및 뼈대구조와 고무멤브레인의 접촉면의 마찰로 인해 이미 성형한 주변지반에 영향을 미치지 않도록 접촉면에는 고압용 그리스를 도포하였다.

#### 3.3 모형 구조물 및 마이크로파일

지표구조물로는 두께 10mm의 강철판(400mm×200mm) 50개를 사용하여 총중량 300kg(36.79 kPa)이 되도록 하여 지표면에 정재하도록 하였다.

모형 마이크로파일은  $\phi 1.7$ mm 철선의 표면에 모래입자를 부착( $\phi 2.3$ mm)하여 표면마찰력을 발휘할 수 있도록 제작되었으며, 본 연구에서는, 길이는 토피고(1.5D)와 동일한 27cm(1.5D)로 고정하였다. 또 터널

중방향으로 3.5cm 간격으로 1열 배치하여 그 설치각도를 달리하므로써 영향을 비교 분석하였다.

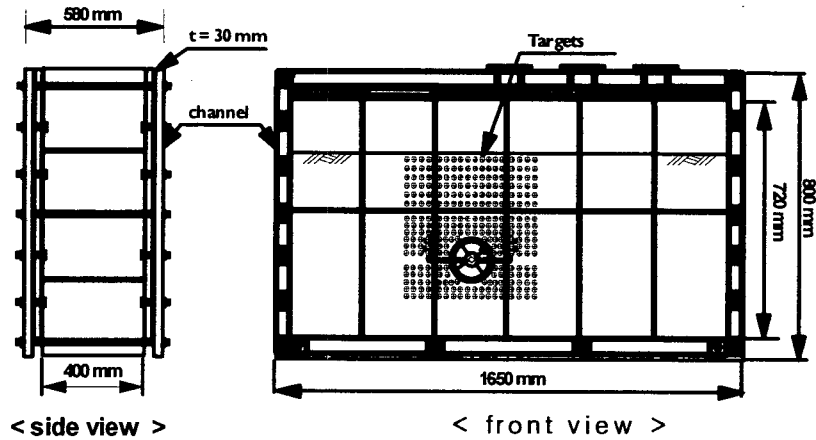


그림 3. 평면변형률 토조

### 3.4 실험의 종류

본 연구는 마이크로파일의 보강효과에 관한 기초적인 연구로서, 토피고(H)가 1.5D로 일정한 경우에 대하여 실드터널 굴착시 구조물의 위치 변화에 따른 지반거동 및 마이크로파일의 설치각도에 따른 지표 침하의 억제효과를 확인하였다.

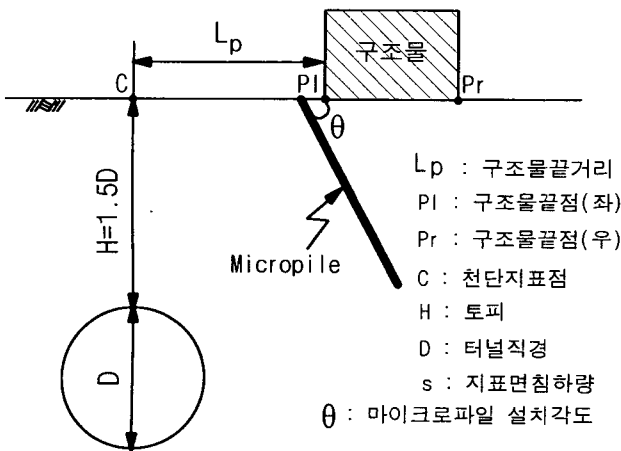


그림 4. 실험에 사용된 각종 기호

표 3 실험의 종류

실험명	구조물위치(L)	보강재 각도( $\theta$ )
L0M0	무재하	무보강
L05M0	0.5D	무보강
L1M0	1.0D	무보강
L15M0	1.5D	무보강
L175M0	1.75D	무보강
L2M0	2.0D	무보강
L1DM30	1.0D	30°
L1DM45	1.0D	45°
L1DM60	1.0D	60°
L1DM90	1.0D	90°

실험의 종류는 표 3과 같으며 실험에 사용된 각종 기호는 그림 4와 같다.

무재하(1 case), 재하(5 cases), 재하+마이크로파일 설치(4 cases) 등을 행하였다. 재하시에는 구조물의 위치를  $L_p=0.5D, 1.0D, 1.5D, 1.75D, 2.0D$ 로 하였으며,  $L_p=1.0D$ 에서 마이크로파일을  $L_p=3.5cm$ 되는 위치에 1.5D(토피 H와 동일)의 길이로, 설치각도  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 로 달리하여 터널 중방향 3.5cm 간격으로 1열 설치하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 지표구조물의 침하

#### 4.1.1 터널과 구조물 사이의 거리에 따른 구조물 침하량

터널의 굴착이 지표구조물에 미치는 영향은 구조물과 터널 사이의 거리에 따라 다를 것이며, 어떤 거리 이상이 되면 터널굴착의 영향에서 벗어나게 될 것이다. 본 연구에서는 지표구조물과 터널 사이의 거리( $L_p$ )를 달리하면서 실험을 하였다. 토파  $H=1.5D$ 인 본 실험의 경우, 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 터널~구조물 거리가 약  $1.75D$ 일 때까지는 구조물의 침하량이 거의 직선적으로 감소하며, 약  $2.0D$  이후에서는 터널 굴착이 구조물의 침하에 거의 영향을 미치지 못한다. 이 한계거리에서는 그림 6과 같이 터널중심과 구조물 끝점이 이루는 각이  $45^\circ$ 가 된다.

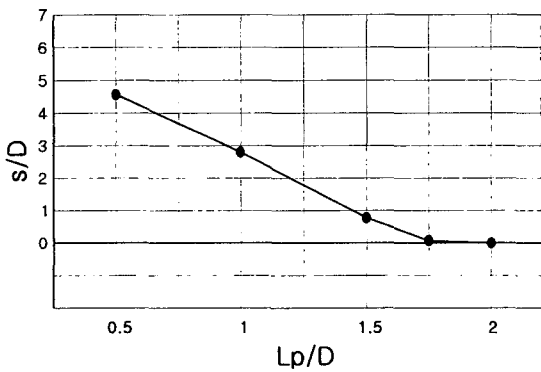


그림 5. 터널직경(D)으로 무차원화한 구조물의 위치( $L_p$ )에 따른 구조물끝점(좌)의 침하량(s)

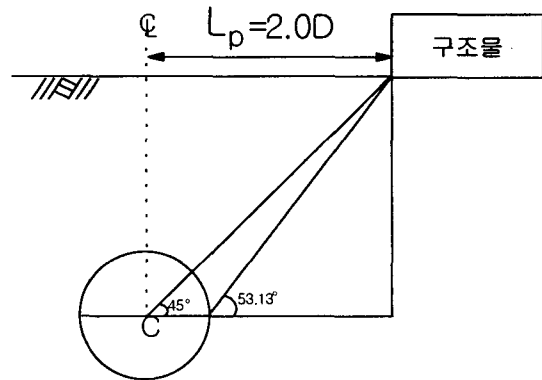


그림 6. 구조물의 영향권 한계

#### 4.1.2 마이크로파일 설치시의 지표면 및 지표구조물 침하

본 연구에서는 실드 테일보이드 발생으로 인한 지표구조물의 침하발생을 억제하기 위한 대책으로서 마이크로파일을 사용하였다. 실드 테일보이드를 근사시키기 위하여 터널직경을 10% 축소시켰으며, 이때의 구조물 좌측끝점에서의 침하량을 비교하여 구조물의 거리에 따른 마이크로파일의 침하 억제효과를 분석하였다.

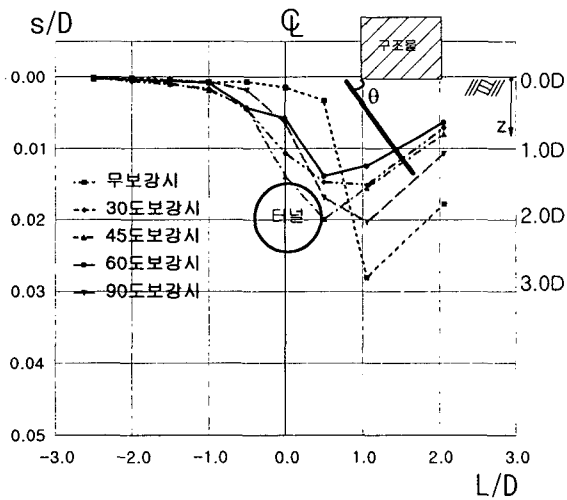


그림 7. 마이크로파일 보강각도에 따른 지표침하량(터널직경 10%축소시)

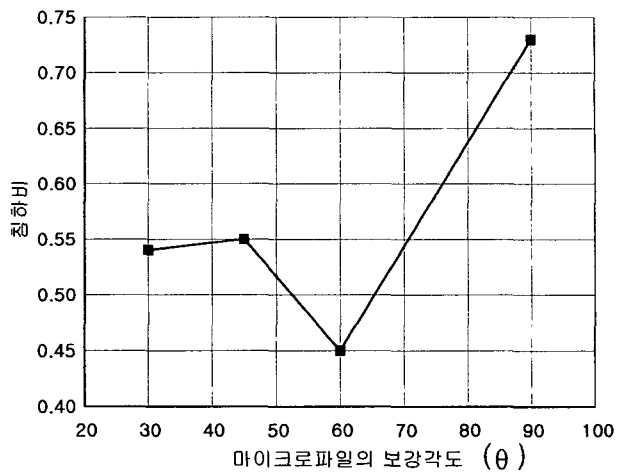


그림 8. 마이크로파일 보강각도에 따른 침하비(무보강일 경우의 침하비=1)

그림 7은 각종 시험에 대한 지표침하량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 무보강시의 실험 L1M0( $L_p=1D$ 에 구조물이 위치, 무보강)(표 3, 그림 4 참조)에서의 구조물 좌측 끝점의 침하량을 기준(1.0)으로 하면 구조물이 동일한 위치에 있고  $\theta=30^\circ$  인 경우는 침하비가 0.54,  $\theta=45^\circ$  인 경우는 0.55,  $\theta=60^\circ$  인 경우는 0.45,  $\theta=90^\circ$  인 경우는 0.73으로  $\theta=60^\circ$  인 경우의 침하가 가장 작다(그림 8).

여기서, 그림 7에서 알 수 있듯이 보강에 의해 구조물의 침하는 현저히 감소하나 터널 상부지반의 침하는 오히려 증가하는 현상이 나타나는데, 이는 보강에 의해 억제된 침하가 주변으로 분산된 것으로 추정되지만 아직 확정적으로 말할 수는 없다. 앞으로 이에 대한 연구와 보강에 의해 분산되는 주변지반의 침하까지도 억제할 수 있는 방안에 대한 연구도 계획하고 있다.

## 4.2 터널 주변지반의 거동

실드터널 굴진시 테일보이드가 터널 주변지반에 미치는 영향을 충분히 고려할 수 있는 영역에 대해 요소망을 구성하였으며, 이렇게 구성된 유한요소망을 어떤 변형발생시에 대해 사진촬영하고 이들 사진(변형전과 변형후)을 4절점 등매개변수요소를 사용하여 변형해석<sup>1)</sup>을 하였다.

그림 9는 터널직경 축소전과 터널직경 축소가 10%일 때의 무보강시의 지반요소의 변형을 나타낸다. 또, 그림 10은 그림 9와 동일한 실험에서 지반변위를 확대해서 나타낸 것이다.

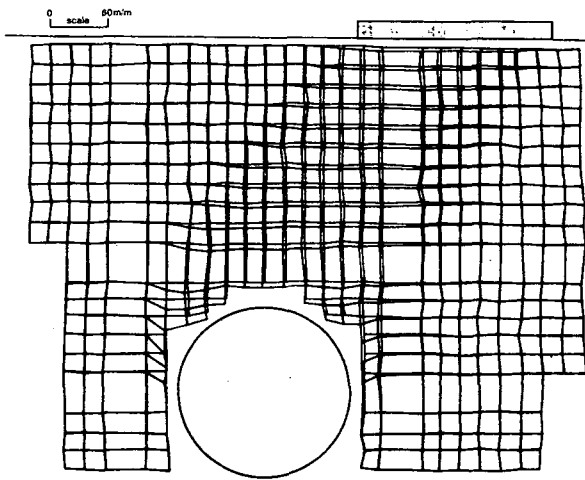


그림 9. 변형전·후(터널직경 축소율  $\alpha=0 \rightarrow 10\%$ )의 지반요소(실험명 : L05M0)

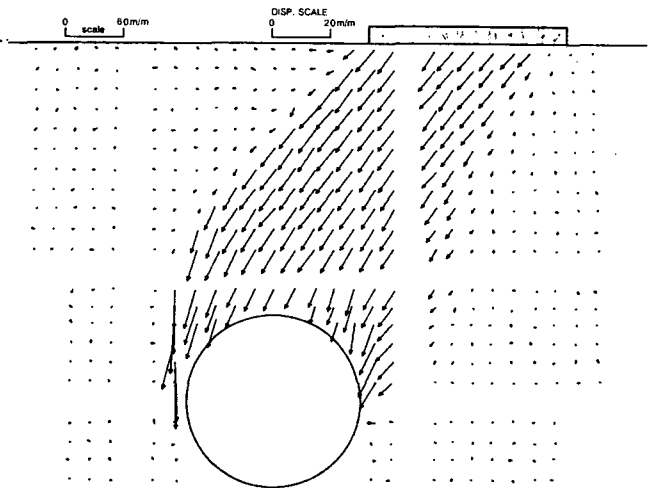


그림 10. 절점의 변위도(그림 9와 동일실험)

### 4.2.1 파괴면의 형성과정

그림 9, 그림 10을 보면, 변위의 불연속면이 파괴면이라는 정의로부터 대략적인 파괴면의 위치를 알 수 있다. 그러나, 실제 실험에서 보다 명확히 파괴면의 위치를 찾기 위해서는 최대전단변형률의 집중면(즉, 최대전단변형률 등고선의 정상)이란 정의를 사용하는 것이 좋다<sup>1)</sup>.

그림 11은 무보강시의 터널직경 축소에 따른 파괴면의 형성과정을 나타낸다. 이 그림의 (a), (b)를 비교해 보면, 구조물의 좌측끝점과 터널 좌측 어깨부가 연결되는 1차 파괴면이 발달하고, 테일보이드(여기서는 직경축소율)가 커짐에 따라 구조물 우측끝점과 터널 우측 어깨부가 연결되는 2차 파괴면이 형성된다는 것을 알 수 있다.

이 사실로 볼 때, 테일보이드의 영향이 작은 지반에서는 구조물 좌측지반을 보강하여 1차 파괴면의 발달만 막으면 구조물의 침하가 억제될 수 있지만, 테일보이드의 영향이 큰 지반에서는 구조물 좌측뿐

만 아니라 우측지반도 보강하여 2차 파괴면 발달로 인한 구조물의 침하도 억제하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다. 물론, 구조물 좌우측에 보강할 경우의 효과적인 보강방향은 각각 달라질 것이다. 본 연구에서는 다음절에서 기술하는 구조물 좌측에 보강할 때의 보강방향에 한정하기로 한다.

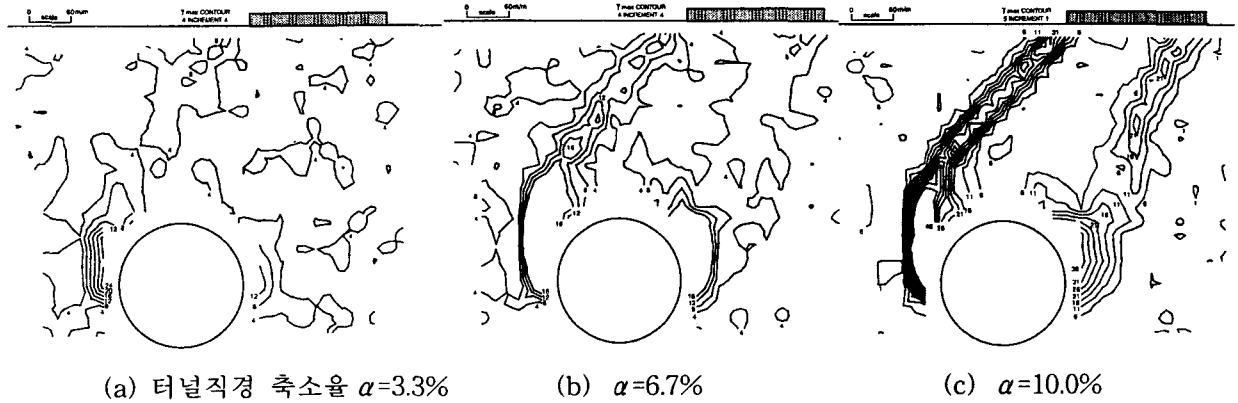


그림 11. 파괴면의 형성과정(L05DM0)

#### 4.2.2 보강방향

최소 주변형률증분의 방향은 지반이 인장변형을 일으키고 있는 방향으로서 이 방향으로 인장보강재를 보강하게 되면 지반은 인장강도를 가지게 된다. 따라서, 파괴면이 발생하려는 위치에 최소 주변형률증분의 방향으로 인장보강재를 설치하면 가장 효과적으로 지반변형을 억제할 수 있다. 이는 임 등<sup>2)</sup>, 후꾸시마(福島) 등<sup>3)</sup>의 연구에서도 확인되었다.

그림 12는 무보강시의 실험 LIM0에 대한 최대·최소 주변형률증분의 방향을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 마이크로파일 중 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 구조물의 좌측끝에서 수평면과 60° 각도로 설치하는 것이 가장 보강효과가 좋은데, 이는 그림 12의 구조물 좌측 끝점 부근의 지반의 최소 주변형률증분의 방향과 비슷하다는 것으로도 증명될 수 있다.

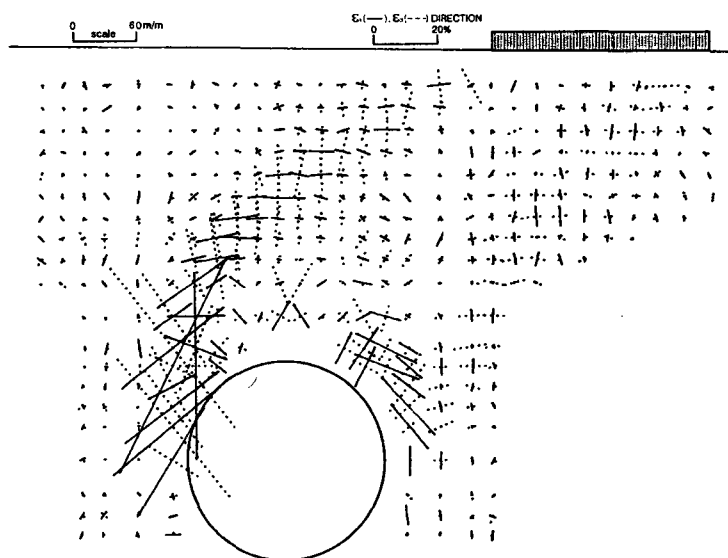


그림 12. 최대·최소 주변형률증분의 방향 (LIM0, 터널직경 축소율  $\alpha=10\%$ )

## 5. 결론

실드 테일보이드에 의해 발생하는 지표구조물의 침하를 억제하기 위한 대책으로 마이크로파일을 적용한 경우의 실내모형실험을 통해서 다음과 같은 기초적인 사항을 알 수 있었다. 단, 이 결과들은 토피고  $H=1.5D$ 인 경우에 한한다.

(1) 지표구조물이 터널중심에서 수평거리로 터널중심~천단지표점거리(여기서는  $2 \times$  터널직경)이상 떨어지면 터널굴착이나 테일보이드의 영향이 구조물에 미치지 않는다.

(2) 구조물의 터널측 끝점 부근에 마이크로파일을 수평면과  $60^\circ$  각도(여기서는 마이크로파일의 길이는 토피고와 동일한  $1.5D$ 로 고정)로 설치할 때 구조물의 침하 억제효과가 가장 크다. 본 연구에서의 실험방법으로는  $60^\circ$  보강이 무보강의 0.45배 정도의 구조물침하가 발생하였다.

(3) 현재 토피고, 보강밀도, 보강위치, 구조물 하중 등을 변화시키면서 다양한 연구가 진행되고 있으며, 앞으로 터널 내부에서의 보강에 의해 지표구조물의 침하를 억제할 수 있는 방안에 대해서도 연구하여, 지표와 터널내부에서의 복합적인 보강을 통해서 보다 효과적인 구조물 침하 억제대책을 수립할 수 있을 것으로 생각한다. 또한 지반의 요소시험결과를 이용한 수치해석도 행하여 현장에서의 적용성을 높일 계획이다.

## 참고문헌

1. 林鍾鐵, 朴性栽, 朱仁坤, 朴鏞富, 金永仁(1992. 3), “平面變形率 狀態에 있는 模型地盤의 變形解析法”, 韓國地盤工學會誌, 第8卷 第1號, pp.29~39.
2. 임 종철, 박 이근, 고 호성, 오 명렬(1997), “토사NATM에서 라이닝 및 볼트 길이비에 따른 침하 감소 효과에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II). pp.369-372.
3. 福島伸二, 望月美登志, 香川和夫, 横山 章(1989. 6), “土被りの浅い砂質地山トンネルの補助工法に関する模型實驗”, 日本 土木學會論文集 第406号/III-11, pp.79~86.